極低速度研削加工における構成刃先の発現*

——極低速度研削加工の研究（第2報）——

中 島 利 勝** 塚 本 真 也** 菅 野 典 生***

Phenomena of Built-up Edges in Very Low Speed Grinding Process

—— Very Low Speed Grinding Process (2nd Report) ——

Toshikatsu NAKAJIMA, Shinya TSUKAMOTO and Norio SUGANO

Analyses of the first report suggested that the unique phenomena in very low speed grinding process might be generated by the "built-up edges" in grinding machining. Explanation of the growth mechanism on the unique phenomena has been made clear in this report. Main conclusions are as follows: (1) In very low speed range of the unique phenomena the variations of abrasive grain temperature almost agree with the variations of cutting point temperature that the built-up edges are generating in the cutting process. (2) Micro-structure of the adhered material to grinding wheel surface shows the similar structure of the built-up edges in the cutting process. (3) The adhered material can generate the grinding chips after considering the comparison of hardness between the adhered material and grinding chips. The facts of above conclusions become clear that the "built-up edges" have been formed in very low speed grinding process.

Key words: built-up edge in grinding process, very low speed grinding process, unique phenomenon, adhered material, grinding chip, grinding temperature of abrasive grain.

1. 結 言

前報¹⁾では、砥石周速度が1～3m/sの極低速度域における『特異現象の発生』を確認した。すなわち、この速度域で砥石摩耗速度の急増に伴って、研削抵抗が極小になり、さらに表面粗さが顕著に劣化する現象が発生する。前報¹⁾の解析では、砥石摩耗速度の急増とともに砥粒分布密度が急減し、その結果、砥粒1切れ刃の平均切削断面積が増大し、この平均切削断面積の変化が寸法効果として作用するために、研削抵抗と表面粗さに関する特異現象が発生すると判断した。しかし、極低速度域において砥石摩耗速度が急増する原因すなわち特異現象の発生機構に関しては解明できなかった。本研究の極低速度域に相当する切削加工の速度領域では『構成刃先』が発生することは周知の現象である。さらに、研削抵抗の減少、表面粗さの劣化ならびに摩耗の急増など極低速度域での特異現象は切削加工において構成刃先に付随して出現する現象²⁾に酷似している。従って、極低速度研削加工においても構成刃先が発生している可能性は否定できない。

以上、本報告では極低速度研削加工の特異現象が切削加工の構成刃先に相当する現象によって発現している可能性があるとの観点から、砥粒研削点温度の測定、砥石面付着物の腐食断面の観察さらに付着物と切り屑の硬度比較に関する解析を行い、特異現象の発生機構を解明し、極低速度研削加工における構成刃先の発現の有無について考察する。

2. 極低速度領域における特異現象

実験は円筒ブランジ研削方式で行い、砥石周速度 V_s と工作物周速度 V_w をインバータで制御し、速度比 K_v を一定($=0.05$)とした条件の下で、砥石周速度 V_s を0.5m/sの極低速度域から30m/sの通常研削速度域まで変化させた。研削温度はコンスタンター工作物-熱電対法でスリップリングを介して測定し、砥石面付着物と切り屑の硬度はマイクロビッカース硬度計(明石製作所 MVK-G2; 最小荷重: 1gf)で0.0294N (3gf) 荷重で荷重保持時間30秒で測定した。その他の実験条件は前報¹⁾と同様で以下に示すとおりである。

研削砥石: WA80L7V ($\phi 400\text{mm} \times 50\text{mm}$)

工 作 物: S45C ($H_v=210, \phi 100\text{mm} \times 10\text{mm}$)

速 度 比: $K_v=0.05$

設定砥石切込み量: $\Delta = 2 \mu\text{m/rev. of W.P.}$

* 原稿受付 平成2年4月7日。平成元年度精密工学会大分地方学術講演会(平成元年11月23日)にて発表
** 正 会 員 岡山大学工学部(岡山市津島中 3-1-1)
*** 学生会員 岡山大学大学院

Fig.1 Unique phenomena in very low speed grinding process

システム系の剛性: $k_{sy} = 10.4$ N/ μm

ドレッシング条件: 切込み $5 \mu m \times$ 送り $0.2 mm \times 5$ 回
研削液: W2種1号, 80倍希釈, 15 ℓ / min

図1に前報¹⁾で解析した特異現象に関するデータを再録する。図1(a)の C_o/v_p , C_o'/v_p は摩滅型と破碎・脱落型の摩耗形態におけるそれぞれの摩耗速度 C_o , C_o' とプランジ速度 v_p との比で示す砥石摩耗速度比である。この C_o'/v_p が $V_s = 1 \sim 3 m/s$ で極端に大きな値を示すために、砥石作用面の砥粒分布密度が減少し、その結果、図1(b)に示す1切れ刃の平均切削断面積 a_m がこの領域で極大となる。この a_m の変化、すなわち寸法効果のために比研削抵抗 K_g が小さくなる領域で研削抵抗 p_s , q_s も減少し、さらに、 a_m の増大は定常状態の工作物の表面粗さ $(R_{max})_s$, ならびにスパークアウト完了後の工作物の表面粗さ $(R_{max})_r$ を急速に劣化させるものと判断した。

Fig.2 Measurement of grinding wheel surface roughness by reproducing on acrylic acid resin

しかし、前報の解析範囲では $V_s = 1 \sim 3 m/s$ の速度域において砥石摩耗速度が急増する原因すなわち極低速度研削加工における特異現象の発生機構に関しては説明できなかった。そこで、本研究では極低速度域における特異現象が切削加工の構成刃先に相当する機構によって発生している可能性があるとの観点から検討を重ねた。切削加工において構成刃先が発生する切削点温度には一定の温度範囲が存在し、温度が低すぎても高すぎても切削点に構成刃先が形成されない²⁾。この現象に着目して、砥石作用面に構成刃先に相当する凝着物が発生しているか否かを簡便に検証したのが図2、図3である。

図2は工作物の一部に板厚 $b = 2 mm$ のアクリル板を埋め込み b/K_v の幅の砥石作用面を転写させ、工作物表面粗さとアクリル板に転写した砥石作用面粗さを $V_s = 2, 30 m/s$ において比較したものである。図3に示すように特異現象が発生しない速度領域では定常状態の工作物と砥石作用面の粗さ(図中の○)の関係は破線で示されるように、砥石作用面の粗さがそのまま工作物に転写されていることがわかる。これは、アクリル板を研削時には研削温度は殆ど上昇しないため構成刃先に相当する凝着物は生成しないと考えられ、また、工作物の研削時に凝着物が付着した砥石作用面でアクリル板を研削する場合でも、付着力を維持するだけの研削温度に達しないため、この凝着物は切れ刃として作用しないためと推定される。従って、横軸の砥石作用面粗さは単純に砥石摩耗による砥石面性状の変化を

Fig. 3 Comparison between workpiece surface roughness and wheel surface roughness

再現したものと考えることができる。この砥石作用面粗さで研削した工作物が、 $V_s = 1 \sim 3\text{m/s}$ (図中の●) の範囲において、この砥石作用面粗さ以上に粗さ値が増加することは、工作物を研削中に砥石作用面に工作物表面粗さを悪化させる凝着物などが発生するとは考えられない。従って、この解析は砥石作用面の砥粒研削点に構成刃先などの特異現象が発生している可能性を示唆するものである。この現象をさらに明確なものにするために、次節において研削温度の観点から検討する。

3. 極低速度領域における砥粒研削点温度の測定

図4に研削温度の測定装置を示す。研削温度は工作物に厚さ $6\mu\text{m}$ のラップフィルムで絶縁した $\phi 127\mu\text{m}$ のコンスタンタン線を押しつぶした状態で埋め込み工作物間に熱電対を形成させて、出力信号をスリップリングを介して、メモリ式オシロスコープ (応答性 100MHz) で検出し、デジタルレコーダに記録した。

図5は熱接点における砥粒研削状態のモデル図と熱接点の形成状況を示す。研削点温度は、砥粒研削点温度 θ_g 、干渉領域の砥石研削点温度 θ_s さらにに工作物の表面平均温度 θ_w の3種類に分類³⁾される。

図6に砥石周速度 $V_s = 10\text{m/s}$ におけるこれら研削温度の測定例を示す。図6(a)は工作物の表面温度 θ_w の研削時間 t に対する変化を示したもので、 θ_w は過渡・定常・スパークアウト状態でそれぞれ増加・一定・減少の変化過程を示すことがわかる。ここで、定常状態の θ_w を $(\theta_w)_s$ と定義する。図6(b)に図6(a)の定常状態において熱接点を砥石作用面が通過したときの砥石研削点温度 θ_s と砥粒研削点温度 θ_g の測定例を示す。測定信号の変化から砥粒が熱接点を通過する毎にパルス状の温度が発生することが分かる。ここで、干渉域における最大の θ_s 、 θ_g をそれぞれ $(\theta_s)_{\max}$ 、 $(\theta_g)_{\max}$

Fig. 4 Measuring instruments of grinding temperature

Fig. 5 Grinding temperatures θ_w , θ_s , θ_g and photograph of thermal contact point between constantan and workpiece

と定義する。さらに図6(c)にオシロスコープの掃引速度を増加させた場合の θ_g の変化を示す。図より本測定法は砥粒研削点温度 θ_g の変化をほぼ正確に追従しているものと考えられる*。

図7に特異現象が発生する砥石周速度 $V_s = 2\text{m/s}$ における3種類の研削温度 θ_w 、 $(\theta_s)_{\max}$ 、 $(\theta_g)_{\max}$ と砥石摩耗量 d_0 の変化を示す。図(c)に示すように研削時間 $t = 90\text{s}$ を境にして砥石摩耗速度が急増する。砥石研削点温度 $(\theta_s)_{\max}$ も若干 $t = 90\text{s}$ 付近で増加割合が変化しているが、砥粒研削点温度 $(\theta_g)_{\max}$ ではこの摩耗形態の遷移点で増加割合が明確に変化する。こ

* 図5の熱接点の一部を砥粒が研削した場合、熱接点の熱容量のために θ_g は実際の温度よりも幾分低めに検出される。しかし、 $(\theta_g)_{\max}$ は熱接点を通過した最大接触幅あるいは最大切込み深さを有する砥粒の研削温度に相当する。従って、 $(\theta_g)_{\max}$ が実際の砥粒研削点温度に最も近い値を示すものと考えて、以下の考察は $(\theta_g)_{\max}$ を用いて行った。

Fig.6 Variations of grinding temperatures θ_w , θ_s and θ_g with grinding time t at wheel speed $V_s=10\text{m/s}$

のことから、砥粒研削点温度 $(\theta_g)_{\max}$ は砥石摩耗形態と密接に関連した現象量であることが理解できる。

図8 (a), (b) に砥石周速度 V_s に対する研削温度と砥石摩耗速度比 C_o'/v_p , C_o'/v_p の変化を示す。 V_s の増加に対して3種類の研削温度は単調増加の変化を示す。特に注目すべきは、 $V_s=0.5 \sim 10\text{m/s}$ までの速度域で砥粒研削点温度 $(\theta_g)_{\max}$ が約 100°C の低温域から 800°C 以上の高温域まで連続的に増加することである。この $(\theta_g)_{\max}$ の変化曲線上に、 -10° のすくい角を有する超硬工具を用いた切削実験で構成刃先の発生する温度範囲²⁾を網目領域で示すと、この網目領域と砥粒研削点温度 $(\theta_g)_{\max}$ の重なる部分は砥石摩耗速度比 C_o'/v_p の急増する領域とほぼ符合することがわかる。図8中の文献2)の網目領域と本実験の特異現象の発生温度領域は、工具のすくい角、工具材質、被削材など

Fig.7 Variations of maximum grain temperature $(\theta_g)_{\max}$ and wheel wear d_o with grinding time t

Fig.8 Variations of maximum grain temperature $(\theta_g)_{\max}$ and ratio of wheel wear rate to plunge speed C_o'/v_p , C_o'/v_p with wheel speed V_s

実験条件が異なるため定量的に比較することはできないが、しかし、この図8は切削加工において刃先温度のある特定の温度領域に構成刃先が発生し、また研削加工においても、砥粒研削点温度 $(\theta_g)_{\max}$ が高温に達するまでの、ある温度領域で同様の現象が発生している可能性を定性的に示唆しているものと判断される。

Fig. 9 Observation of adhered material to grinding wheel surface and grinding chips

さらに、WA砥石と同材質である Al_2O_3 系切削工具においても構成刃先は発生するとの報告⁴⁾を考慮すると、本実験の砥石周速度 $V_s = 1 \sim 3$ m/s の速度域において研削温度の観点からは構成刃先が発生しているものと推測される。すなわち、砥石周速度 V_s の増大に伴って砥粒研削点温度 $(\theta_g)_{max}$ は連続的に増加し、図中の構成刃先発生の下限温度以上に $(\theta_g)_{max}$ が昇温すると、砥粒研削点に構成刃先が凝着し、この構成刃先の脱落時に一部の砥粒の破碎・脱落が顕著に発生する結果、 $V_s = 1 \sim 3$ m/s で砥石摩耗速度比 C_o'/v_p が急増したものと推測される。また、 V_s が 5 m/s からさらに増加すると、 $(\theta_g)_{max}$ は増大し、構成刃先の消滅温度を超過し、この消滅温度以上では砥石作用面の付着物は凝着力を維持できなくなるために構成刃先が発生しなくなり、その結果、砥石摩耗速度比 C_o'/v_p は急速に定常摩耗状態 (C_o/v_p) に復帰するものと考えられる。

以上の研削温度の考察から、本実験の $V_s = 1 \sim 3$ m/s においては砥粒研削点に構成刃先が発現していると考え、特定速度域で砥石摩耗速度が急増する原因すなわち極低速度域における特異現象を合理的に説明できる。

4. 砥石面付着物の組織と硬度の変化

次に砥石面付着物の組織観察とマイクロビッカース硬度の観点から考察する。

図9 (a) に砥石周速度 $V_s = 0.5, 2, 30$ m/s における砥石面付着物の断面組織写真を、図9 (b) に対応する定常状態の切り屑の SEM 写真を示す。付着物は砥石作用面を接着剤で固定した状態で研削砥石を切断し、樹脂に埋め込み砥石端面方向からラップ仕上げした後、ナイトル液（硝酸 2.5%，エタノール 97.5%）で腐食させた。図9 (a) の写真より、 $V_s = 0.5$ m/s の付着物は帯形状をしており、 $V_s = 30$ m/s では複数個の細長い帯形状付着物の集合体が観察される。図9 (b) の切り屑写真と比較しても形状・寸法はほぼ同等であることから、 $V_s = 0.5$ と 30 m/s の付着物は1個または複数個の切り屑が砥石面のチップポケットに集積したものであると判断される。一方、特異現象が発生する $V_s = 2$ m/s の付着物は工作物の組織が薄く引伸ばされた層状組織を呈し、これは、切削加工において一般的に観察される構成刃先の組織性状⁵⁾と極めて良い類似を示している。さらに切り屑の写真と比較しても、 $V_s = 2$ m/s

Fig.10 Comparison between hardness of adhered material (H_v)_a and grinding chips (H_v)_c.

の付着物は形状・寸法が明確に異なり、切り屑とは別の構成物であると考えられる。

図10に砥石周速度 V_s に対する砥石作用面の付着物と切り屑のマイクロビッカース硬度の変化を示す。図中の硬度は付着物と切り屑それぞれ30～50点の測定データの平均値として求めた。付着物硬度(H_v)_aは $V_s=0.5, 20, 30\text{m/s}$ では切り屑と全く同じ値を示したが、 $V_s=1\sim10\text{m/s}$ の(H_v)_aは切り屑硬度(H_v)_cよりも大きいことがわかる。さらに、特異現象の発生する速度域 $V_s=1\sim3\text{m/s}$ で両者の硬度差が拡大している。すなわち、この速度域の付着物硬度(H_v)_aは切り屑硬度(H_v)_cと比較しても約100 H_v の硬度差を維持しており、特異現象が発生する速度域の付着物は切り屑以上に顕著な加工硬化を示していることがわかる*。切削加工における構成刃先の硬度分布の解析⁶⁾から100 H_v 程度の硬度差が存在すれば、この付着物で図中の硬度を有する切り屑を研削することが可能であると考えられる。上述の硬度差の観点から、図9の付着物と切り屑の観察写真を再考察すると、図9(b)の $V_s=2\text{m/s}$ の切り屑面性状には他の速度域の切り屑に観察される砥粒との摩擦で生成された金属光沢面が存在せず、著しく劣化した面性状を示していることに気が付く。これは、 $V_s=2\text{m/s}$ の砥石面付着物が構成刃先であると考え、構成刃先はアルミナ砥粒よりも硬度が低いため、砥粒の研削よりも切れ味が低下し、さらに構成刃先の一部は切り屑に凝着したまま脱落するために、上

* 砥石面の付着物にはチップポケットに堆積した切り屑と砥粒に溶着した凝着物の2種類が存在すると考えられる。従って、付着物硬度(H_v)_aは若干小さく測定されているものと推定される。

述のような劣化した面性状を示すものと推察される。また、切削加工における構成刃先による切り屑も同様の面性状を示す⁷⁾ことを付記しておく。

5. 結 論

砥石周速度 $V_s=1\sim3\text{m/s}$ の極低速度域における炭素鋼S45Cの研削時に、砥石摩耗速度の急増に伴って研削抵抗が極小となり、さらに表面粗さが顕著に劣化するなどの特異現象が発生する。本報告ではこの特異現象の発生機構を解明するために、砥粒研削点温度の測定、砥石面付着物の観察さらに付着物と切り屑の硬度比較に関する解析を行った。得られた主な結論は以下のとおりである。

- (1) 特異現象は砥粒研削点温度の、ある特定領域で発生し、これは切削加工における構成刃先の発生温度領域が限定される現象と定性的に一致する。
- (2) 切り屑と砥石面付着物とは、特異現象の発生領域において硬度差が存在し、これは切削加工の構成刃先と切り屑との硬度差と同程度である。
- (3) 特異現象の発生する速度域における砥粒付着物の断面組織は切削加工の構成刃先と同様の層状組織を示す。

以上の結論から、極低速度域の $1\sim3\text{m/s}$ における砥粒研削点に切り屑硬度以上に加工硬化された層状組織を有する構成刃先が発現するものと推定される。

また、前報¹⁾で特異現象が発生する速度領域以下では品質・精度の観点から極低速度研削加工の適用範囲が十分に存在することを示した。さらに軸付砥石あるいはマシンニングセンタにおいて、砥石周速度が低速度から極低速度域において具体的に研削加工が行われている現実を考慮するならば、構成刃先による特異現象は、上述の極低速度研削加工の品質・精度ならびに能率を決定する要因となり、従って、本報告で解明した構成刃先の発現は研削加工分野に重要な新知見を提供するものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 中島利勝, 塚本真也, 菅野典生: 極低速度研削加工の研究(第1報)——極低速度領域における研削現象——, 精密工学会誌, 56, 11(1990) 2075.
- 2) 中山一雄: 構成刃先の研究(第2報), 精密機械, 23, 3(1957) 100.
- 3) 中島利勝, 鳴瀬剛彦: 機械加工学, コロナ社(1983) 157.
- 4) 精密学会切削加工専門委員会: セラミック工具の切削性能と実用性, 精密機械, 25, 9(1959) 465.
- 5) 田中義信, 津和秀夫: 精密工作法[上巻], 共立出版(1972) 27.
- 6) 星 光一, 星 鐵太郎: 金属切削技術(改訂版), 工業調査会(1981) 32.
- 7) 中山一雄: 切削加工論, コロナ社(1980) 23.